بهینه‌سازی نیروگاه دودکش خورشیدی جهت حصول به ماکزیمم توان خروجی

علی بخش کسائیان[۱]، فهیمه یوسفی مقدم[۲]، پرویز محمدزاده[۳]، فاطمه راضی آستارایی[۱]،رضا علائی[۴]

تاریخ دریافت مقاله: ۹۵/۰۵/۱۸

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۵/۱۱/۰۱

چکیده:

افزایش روزافزون جمعیت و تقاضای انرژی و همچنین آلودگی‌های زیست‌محیطی ناشی از سوخت‌های فسیلی، بشر را به‌سوی استفاده از انرژی‌های تجدید پذیر هدایت نمود. در این میان، نیروگاه دودکش خورشیدی یکی از انواع سامانه‌هایی است که برای استحصال انرژی بسیار پرکاربرد است. به دلیل پایین بودن بازده این سیستم، بهینه‌سازی جهت ارتقا کارایی سیستم در این مقاله موردتوجه قرارگرفته است. در این راستا، بهینه‌سازی دودکش خورشیدی برای رسیدن به بالاترین توان در حالت تئوری انجام‌شده است. تابع هدف این مطالعه، توان خروجی سیستم در نظر گرفته‌شده است. متغیرهای طراحی، اجزای هندسی سیستم شامل ارتفاع و شعاع دودکش، ارتفاع و شعاع کلکتور و فاصله توربین از زمین را دربرمی گیرند. در پیاده کردن الگوریتم بهینه‌سازی، از روش گرادیان پایه برنامه‌ریزی متوالی درجه‌دو استفاده‌شده است و مقادیر بهینه متغیرها برای رسیدن به بیشینه توان خروجی حاصل شد.

کلمات کلیدی:

دودکش خورشیدی، بهینه‌سازی، الگوریتم گرادیان پایه، الگوریتم ژنتیک.

۱) عضو هیئت‌علمی دانشکده علوم و فنون نوین دانشگاه تهران، گروه انرژی‌های نو (نویسنده مسئول) akasa@ut.ac.ir
۲) دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده علوم و فنون نوین دانشگاه تهران، گروه انرژی‌های نو
۳) عضو هیئت‌علمی دانشکده علوم و فنون نوین دانشگاه تهران، گروه هوافضا
۴) دانشکده مکانیک، واحد گرمی، دانشگاه آزاد اسلامی، گرمی، ایران

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-10-27]

مقدمه

در سال‌های اخیر، پیشرفت‌های سریع اقتصاد جهانی و افزایش مستمر در تقاضای انرژی با توجه به رشد جمعیت جهان و کاهش سوخت‌های فسیلی، اهمیت منابع انرژی تجدید پذیر را بیشتر از همیشه نشان می‌دهد. دودکش خورشیدی یکی از فناوری‌هایی است که با بهره‌گیری از انرژی خورشید برای تولید برق استفاده می‌شود [۱]. فناوری دودکش خورشیدی برای اولین بار توسط کابانیز[۱] پیشنهاد شد و پس از آن در نشریه تأمین انرژی جهان در آینده توسط گانتر[۲] توضیح داده شد [۲]. اشلایخ[۳] و همکارانش در سال ۱۹۷۸ شروع به طراحی و ساخت اولین نمونه دودکش خورشیدی در مانزانارس[۴] اسپانیا کردند. این سیستم با ارتفاع دودکش ۱۹۴.۶ متر توانست بین اواسط ۱۹۸۶ تا اوایل ۱۹۸۹ مورداستفاده قرار گیرد. برق تولیدی آن نیز به شبکه برق سراسری متصل شود. حداکثر توان این سیستم ۵۰ کیلووات است و دیگر مشخصه‌های آن، قطر دودکش ۵ متر و شعاع کلکتور ۱۲۲ متر است [۳].

هاف[۵] و اشلایش اولین مطالعات روی کارکرد سیستم دودکش خورشیدی را ارائه دادند و نتایج بدست‌آمده را با نتایج نیروگاه مانزانارس مقایسه کردند. سپس مولت روابط ساده ترمودینامیکی حاکم بر جریان نیروگاه را بررسی کرد و روابط حاکم بر کارکرد آن را مطرح نمود. با توجه به اینکه نیروگاه دودکش خورشیدی می‌تواند نقش مهمی در تأمین انرژی برق ایفا کند، دانشمندان و محققان، مطالعات و تحقیقات بسیاری را در راستای یک طراحی بهینه انجام دادند. گانون[۶] و بکستروم[۷] مدل ریاضی این نیروگاه را به همراه یک توربین ارائه دادند و در کار دیگر تاثیر تعداد پره‌های توربین و تعداد رو تورها را بر روی بازدهی نیروگاه بررسی کردند. روابط معادلات حالت توسط پالکی[۸] و شریفتو[۹] در سال ۱۹۸۸ برای تحلیل عملکرد دودکش خورشیدی ارائه شد [۴].

غلام علیزاده و کیم[۱۰] روش بهینه‌سازی چندهدفه‌ای را برای بررسی عملکرد دودکش خورشیدی طراحی کردند. در این بهینه‌سازی، توابع هدفی که به‌طور هم‌زمان باهم بهینه شدند، میزان هزینه، بازده کلی سیستم و توان تولیدشده از سیستم بودند. متغیرهای منتخب برای طراحی، شعاع کلکتور، ارتفاع و قطر دودکش در نظر گرفته شدند. دو سیستم دودکش خورشیدی که برای این کار در نظر گرفته شدند، دودکش خورشیدی ساخته‌شده در کرمان و نمونه ساخته‌شده در مانزانارس

1) Cabaniz
2) Ganter
3) Schliacsh
4) Manzanares
5) Haaf
6) Gannon
7) Backstrom
8) Palki
9) Sherifto
10) Kim

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-10-27]

اسپانیا بودند. نتایج بررسی‌ها نشان داد افزایش توان خروجی از افزایش هزینه در حالت بهینه بالاتر بود. بهینه‌سازی این مطالعه با الگوریتم ژنتیک انجام گرفت [۵].

در مطالعه دهقانی و محمدی، بهینه‌سازی چندهدفه بر اساس تکنیک‌های الگوریتم تکاملی به‌منظور بررسی عملکرد دودکش خورشیدی انجام گرفت. دو تابعی که در این پروژه به‌طور هم‌زمان، روی آنها بهینه‌سازی انجام شد، تابع هزینه و تابع توان خروجی سیستم بود. متغیرهای طراحی در این مطالعه، شعاع کلکتور، ارتفاع و قطر دودکش در نظر گرفته شدند. نتایج حاصل از بهینه‌سازی نشان داد توان خروجی از سیستم وقتی میزان تابش خورشید رو به زیادشدن می‌رود، به‌صورت خطی افزایش پیدا می‌کند. همچنین افزایش دمای محیط باعث کاهش ناچیزی در توان خروجی سیستم شد [۱].

ارتفاع توربین و کلکتور پارامترهای مهمی هستند که در کارهای بهینه‌سازی شده به‌عنوان متغییر در نظر گرفته نشده‌اند. تغییر این متغیرها تاثیر بر سرعت سیال، افت فشار سیال بعد از عبور از توربین و دیگر متغیرهای وابسته سیستم دارد. در این تحقیق، علاوه بر قطر کلکتور، ارتفاع و قطر دودکش، ارتفاع کلکتور و توربین نیز به‌عنوان متغیرهای طراحی در نظر گرفته‌شده‌اند. همچنین در کارهای انجام‌شده از الگوریتم ژنتیک استفاده‌شده است. در این پروژه، به دلیل سرعت و دقت بالای روش گرادیان پایه برنامه‌ریزی متوالی درجه‌دو از این روش در بهینه‌سازی استفاده‌شده است.

جدول ۱) فهرست علائم

d (m)	مشتق کلی	v(m/s)	سرعت
p (pa)	فشار	C_p (J/kg K)	ظرفیت گرمایی ویژه هوا
α	ضریب جذب انرژی خورشیدی	q" (W/m2)	توان کلی تابشی خورشید
h (m)	ارتفاع		
r (m)	شعاع	*subscript*	
G (W/m2)	توان حرارتی خورشیدی	1	ورودی کلکتور
ρ (kg/m3)	چگالی	2	خروجی کلکتور و ورودی توربین
U(W/m2 K)	افت کلی انرژی حرارتی	3	خروجی توربین
g (m/s2)	شتاب گرانش زمین	t	توربین
T (K)	دما	c	دودکش
ṁ (kg/s)	دبی جرمی	coll	کلکتور
A (m2)	مساحت	κ	نسبت اختلاف فشار کل از دینامیکی

مدل‌سازی سیستم دودکش خورشیدی

دودکش خورشیدی بر پایه ترکیب سه فناوری است که به ترتیب عبارتند از کلکتور، دودکش و توربین. دودکش ساختار لوله‌ای بلندی است که در وسط کلکتور قرار دارد و توربینی در وسط آن نصب‌شده است. انرژی حرارتی تولیدشده به انرژی جنبشی در داخل دودکش تبدیل می‌شود و نهایتاً با استفاده از توربین متصل شده به ژنراتور، انرژی الکتریکی حاصل می‌شود. شکل (۱) نمای کلی نیروگاه دودکش خورشیدی را نشان می‌دهد.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-10-27]

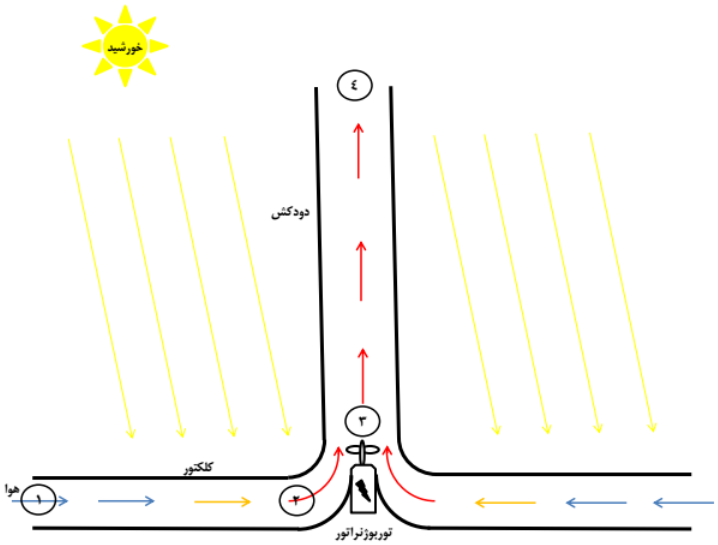
کلکتور و دودکش خورشیدی

با فرض اینکه تغییرات مشخصات فیزیکی سیال در جهت شعاعی و یک‌بعدی است، با نوشتن معادلات پیوستگی و تعادل انرژی رابطه زیر، فشار خروجی از کلکتور به دست خواهد آمد [۶].

$$P_2 = P_1 + \frac{q''\dot{m}}{2\pi h_{coll}^2 \rho_1 c_p T_1} \ln\left(\frac{r_{coll}}{r_c}\right) - \frac{\dot{m}^2}{2\rho_1}\left[\left(\frac{1}{\pi r_c^2}\right)^2 - \left(\frac{1}{\pi r_{coll} h_1}\right)^2\right] \quad (۱)$$

سرعت در انتهای کلکتور با نوشتن معادله برنولی نواحی ۱ و ۲ به دست خواهد آمد. دبی جرمی در طول سیستم ثابت است. بنابراین، با استفاده از این برابری و نوشتن سرعت در ورودی کلکتور برحسب سرعت در خروجی کلکتور، معادله سرعت در خروجی کلکتور به دست می‌آید.

$$v_2 = \sqrt{\frac{2(P_2 - P_1 + g(\rho_2 h_2 - \rho_1 h_1))}{\rho_2^2/\rho_1 \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2 - \rho_2}} \quad (۲)$$



شکل ۱) شمایی از دودکش خورشیدی

توربینی که معمولاً در این دستگاه‌ها استفاده می‌شود، توربین‌های برقابی و یا توربوژنراتورها هستند. کنسریسوک و همکارانش سرعت در حالتی که توربین وجود دارد در مقایسه با سرعت در حالت کل را به‌صورت زیر به

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-10-27]

دست آورده‌اند [۶]. آنان در مطالعه خود توربین را به‌عنوان دیسکی بر سر راه جریان هوا فرض کرده‌اند که باعث کاهش سرعت در خروجی توربین می‌شود و نشان دادند مقدار κ (نسبت اختلاف فشار کل از اختلاف فشار دینامیکی حاصل از انرژی جنبشی) در حالت بهینه ۰/۳۳ است.

$$v_t = v_2\sqrt{(1-\kappa)} \tag{۳}$$

با نوشتن معادله انرژی سیستم و انتگرال‌گیری شعاعی از آن معادله (۵) برای دمای خروجی از کلکتور حاصل خواهد شد[۷].

$$q''2\pi r dr = -\dot{m}c_p dT + 2\pi r dr U(T - T_1) \tag{۴}$$

$$T_2 = T_1 + \frac{G\alpha}{U}\left[1 - \exp\left(\frac{-\pi U(r_2^2 - r_1^2)}{\dot{m}c_p}\right)\right] \tag{۵}$$

محاسبه توان خروجی

اگر فرض شود فرآیند استحصال کار خروجی از توربین به‌صورت آیزنتروپیک باشد، با در نظر گرفتن معادلات مومنتوم و پیوستگی در طول دودکش معادله زیر برای توان خروجی به دست می‌آید [۶].

$$\dot{W}_{ext} = \frac{\rho_2 A_c v_t}{(\rho_2 + \rho_3)/2}(p_2 - p_3) \tag{۶}$$

در معادله بالا، p_2 و p_3 به ترتیب فشار ورودی و خروجی توربین هستند.

بهینه‌سازی نیروگاه دودکش خورشیدی با تابع هدف توان خروجی

هدف از بهینه‌سازی، کمینه یا بیشینه کردن تابع هدف، مشروط به ارضا شدن محدودیت‌های مساله است. انتخاب تابع هدف گام نخست در بهینه‌سازی است که با استفاده از متغیرهای مستقل مساله که متغیرهای طراحی نامیده می‌شوند، بیان می‌گردند. همان‌طور که بیان‌شده، تابع هدف در این مقاله توان خروجی دودکش خورشیدی است که در زیر بیان‌شده است.

تابع هدف

سیستم‌های تبدیل انرژی بر اساس عملکرد و راندمان مقایسه می‌شوند و هرچه توان خروجی سیستم بیشتر باشد، سیستم دارای عملکرد بهتری است و راندمان بالاتری را داراست. تابع هدف مساله که همان توان خروجی از سیستم است، به‌صورت زیر تعریف می‌شود.

$$f(x) = \dot{W}_{ext} = \frac{\rho_2 A_c v_2}{(\rho_2 + \rho_3)/2}(p_2 - p_3) \tag{۷}$$

در معادله بالا، p_2 و p_3 به ترتیب فشار ورودی و خروجی توربین هستند.

متغیرهای طراحی

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-10-27]

متغیرهای طراحی مساله، ابعاد هندسی سیستم شامل ارتفاع دودکش، شعاع دودکش، شعاع کلکتور، ارتفاع کلکتور از سطح زمین و ارتفاع توربین از سطح زمین هستند. در جدول زیر متغیرهای طراحی و محدودیت‌های آنها بیان‌شده است.

جدول ۲) متغیرهای طراحی مساله

علائم	شرح	حد بالایی	حد پایینی
(h_c)	ارتفاع دودکش(m)	۸۰۰	۶۰
(r_c)	شعاع دودکش (m)	۴۲/۵	۵
(r_{coll})	شعاع کلکتور(m)	۷۵۰	۱۰۰
(h_{coll})	ارتفاع ورودی کلکتور(m)	۱۴	۲
$(h_t- h_{coll}/2)$	ارتفاع توربین از سطح زمین(m)	۲۲	۴

حدود بالایی سه متغیر ارتفاع دودکش، شعاع دودکش و شعاع کلکتور بر اساس کار انجام‌شده توسط محمدی و همکارانش بیان‌شده است و آنان نیز برای این قیود از کارهای انجام‌شده هاف (۱۹۸۴) ، اشلایش و هکارانش (۲۰۰۵)، غلام علیزاده و منصوری (۲۰۱۳) برای مطالعه خود بهره برده‌اند [۱]. حد پایین متغیرها، ابعاد سیستم دودکش خورشیدی آزمایشگاهی که توسط کسائیان و همکارانش ساخته‌شده، در نظر گرفته شد. حدود بالایی متغیرهای ارتفاع کلکتور و توربین بر اساس واحد آزمایشگاهی تولید توان مانزانارس تعیین شد [۸].

قیود طراحی

قیود بیانگر رفتار سیستم هستند و اگر نقض شوند، سیستم قادر به تولید توان نخواهد بود. درواقع، قیود طراحی، منحنی‌هایی هستند که تابع هدف را محدود می‌کنند و تابع هدف فقط می‌تواند مقداری را دارا باشد که با منحنی‌های قیود محدود شده است. لذا این مقدار یا باید روی منحنی‌های قیود و یا کمتر از آن باشد. بنابراین، زمانی می‌توان گفت قیود طراحی ارضا شده‌اند که مقدارشان صفر و یا منفی به دست آید. قید اصلی که در این مطالعه اعمال‌شده، قید هندسی است که در زیر بیان‌شده است[۹].

$$g_1(x) = \frac{h_{coll}}{r_c^2} - \frac{h_c}{r_{coll}^2} \leq 0 \qquad (۸)$$

با توجه به حد بالا و پایین ارائه‌شده در جدول (۲) و با توجه به اینکه ارتفاع توربین از سطح زمین نمی‌تواند کوچک‌تر از میانگین ارتفاع کلکتور باشد، معادلات زیر به‌عنوان قیود دیگر نیروگاه دودکش خورشیدی بیان می‌شوند.

$$g_2(x) = 2 - h_t + h_{coll} \leq 0 \qquad (۹)$$

$$g_3(x) = h_t - h_{coll} - 8 \leq 0 \qquad (۱۰)$$

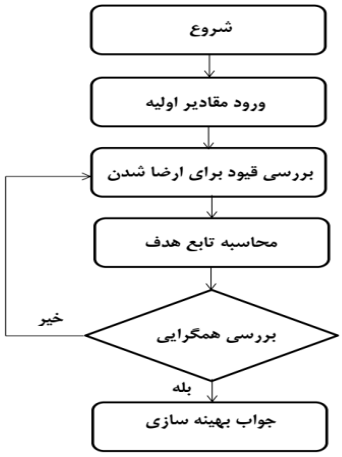
نتایج و بحث

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-10-27]

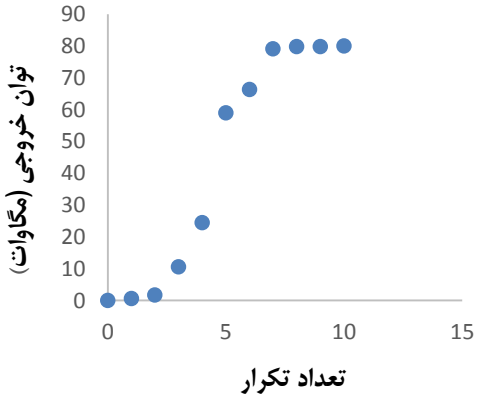
با توجه به اینکه روش گرادیان پایه برنامه‌ریزی متوالی درجه دو، نسبت به سایر روش‌های بهینه‌سازی، از سرعت و دقت بالاتری برخوردار است و همچنین بازه متغیرهای طراحی پیوسته است، برای پیاده‌سازی از روش گرادیان پایه برنامه‌ریزی متوالی درجه‌دو (SQP[1]) استفاده شده است. شکل (۲) مراحل پیاده‌سازی را شرح می‌دهد. همگرایی تابع هدف برای نیروگاه نیروگاه دودکش خورشیدی در شکل (۳) قابل‌مشاهده است. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، مقدار تابع هدف افزایش پیدا کرده و به یک عدد همگرا شده است و دیگر تغییری در آن دیده نمی‌شود که نشان‌دهنده مقدار بهینه تابع هدف است. جدول (۳) مقادیر بهینه متغیرها و تابع هدف را نشان می‌دهد.

جدول ۳) مقدار بهینه تابع هدف و متغیرهای طراحی مساله

متغیرها و تابع هدف	مقادیر بهینه
ارتفاع دودکش (m)	۷۹۰
قطر دودکش (m)	۸۵
قطر کلکتور (m)	۱۳۷۸/۸۵۴
ارتفاع کلکتور (m)	۱۳
ارتفاع توربین (m)	۲۱
تابع هدف (MW)	۸۰



شکل ۲) مراحل پیاده‌سازی الگوریتم SQP

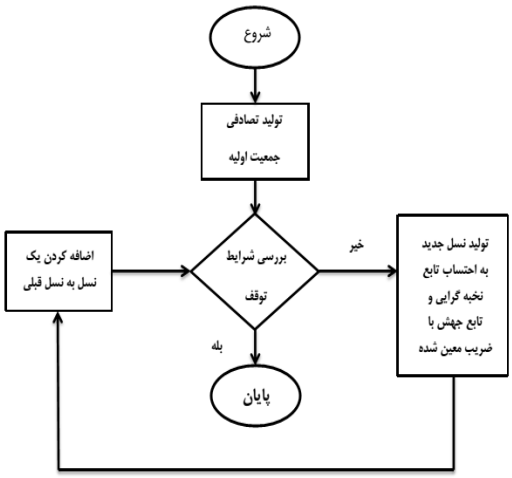


شکل ۳) نمودار همگرایی تابع هدف با استفاده از الگوریتم SQP

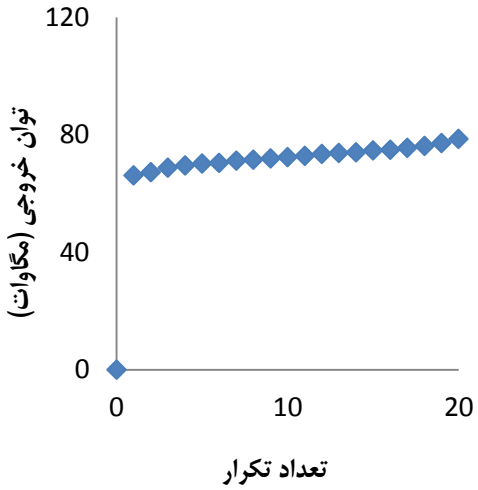
1) Sequential Quadratic Programming (SQP)

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-10-27]

از الگوریتم ژنتیک برای اثبات این ادعا که روش گرادیان پایه از سرعت بالایی برخوردار است، استفاده شده است. شکل (۵) همگرایی تابع هدف با استفاده از الگوریتم ژنتیک را تا تکرار ۲۰ نشان می‌دهد. از مقایسه شکل‌های (۳) و (۵) می‌توان به این نتیجه رسید که الگوریتم SQP سرعت بالاتری نسبت به الگوریتم ژنتیک دارد. همچنین شکل (۴) مراحل پیاده‌سازی الگوریتم ژنتیک را بیان می‌کند.



شکل ۴) مراحل پیاده‌سازی الگوریتم ژنتیک



شکل ۵) نمودار همگرایی تابع هدف با استفاده از الگوریتم ژنتیک

مقدار بهینه متغیرها در مقدار بیشینه توان خروجی از سیستم در شکل (۴) قابل‌مشاهده است. همان‌طور که در بخش قبل گفته شد، قیود بیانگر رفتار سیستم هستند و اگر نقض شوند، سیستم قادر به تولید توان نخواهد بود و بهینه‌سازی با شکست مواجه خواهد شد. جدول (۴) ارضا شدن محدودیت‌های سیستم را بخوبی نشان می‌دهد.

جدول ۴) مقادیر قیود

قیود	مقادیر قیود
$g_1(x)$	-۳/۷۵۶۹
$g_2(x)$	-۵/۵۷۹۷
$g_3(x)$	-۰/۴۷۱

در مقایسه سیستم بهینه‌سازی شده با پایلوت پلنت مانزانارس اسپانیا در خصوص راندمان، نتایجی حاصل شد که در جدول (۵) قابل‌مشاهده است.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-10-27]

جدول ۵) مقایسه راندمان کلکتور دودکش خورشیدی مانزانارس و نمونه بهینه‌سازی شده[۶]

نیروگاه دودکش خورشیدی	مقدار راندمان کلکتور (٪)
پایلوت پلنت مانزانارس اسپانیا	۲۴
نمونه بهینه‌سازی شده	۳۱

نتیجه‌گیری

در این مقاله ابتدا مدل‌سازی عددی نیروگاه دودکش خورشیدی ارائه شد و بعدازآن بهینه‌سازی نیروگاه خورشیدی انجام گرفت. در بهینه‌سازی از روش گرادیان پایه برنامه‌ریزی متوالی درجه‌دو برای بیشینه کردن تابع توان خروجی سیستم استفاده و با الگوریتم ژنتیک مقایسه گردید. متغیرهای طراحی مساله، ابعاد هندسی سیستم بوده‌اند. با توجه به نتایج، می‌توان بیان کرد که افزایش ارتفاع دودکش سبب افزایش توان خواهد شد. همچنین ۸ متر اختلاف ارتفاع کلکتور و توربین منتج به توان بهینه ۸۰ مگاوات شد. بعلاوه، راندمان کلکتور حاصل از بهینه‌سازی ۲۵ درصد نسبت به نیروگاه مانزانارس افزایش داشته است.

منابع

[1] Dehghani S, Mohammadi A.H. Optimum dimension of geometric parameters of solar chimney power plants –A multi-objective optimization approach. Solar energy, 2014; 105: 603-612.

[2] Zhoe X, Wang F, Ochieng R.M. A review of solar chimney power technology. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010; 14: 2315–2338.

[3] Pretorius J. P. Optimization and Control of a Large-scale Solar Chimney Power Plant. Thesis for Ph.D of science degree, Department of Mechanical engineering University of Stellenbosch, 2007.

[4] Haaf W. preliminary test results from the Manzanares pilot plant. International Journal of Sustainable Energy, 1984;2:141-61.

[5] Gholamalizadeh E, Kim M. Thermo-economic triple-objective optimization of a solar chimney power plant using genetic algorithms. Energy. 2014; 70: 204-211.

[6] Koonsrisuk A, Chitsomboon T. Mathematical modeling of solar chimney power plants. Energy, 2013; 51: 314-322.

[7] Hamdan M.o. Analysis of solar chimney power plant utilizing chimney discrete model. Renewable energy, 2013;56:50-54.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-10-27]

[8] Schlaich J, Bergermann R, Schiel W, Weinrebe G. Design of Commercial solar updraft tower systems utilization of solar induced convective flows for power generation. ASME J Sol Energy Eng, 2005;127:117–24.

[9] Koonsrisuk A, Lorente S, Bejan A. Constructal Solar chimney Configuration. International Journal of Heat and Mass Transfer: 2010; 53: 327–333.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-10-27]